

УДК 669.18.046.546.2

Макуров С. Л.¹, Епишев М.В.²

МЕТОД РАСЧЕТА ВЯЗКОСТИ РАСПЛАВОВ ВЫСОКОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ

Предложен метод расчета вязкости расплавов высоколегированных сталей, основанный на осцилляторной теории жидкости. Результаты расчетов показали удовлетворительное совпадение с экспериментальными данными.

Значительное число экспериментальных и теоретических работ посвящено изучению структурно чувствительных свойств, и, в частности, вязкости металлических расплавов [1-4 и др.]. Использование данных о таких свойствах позволяет разрабатывать модели строения жидких металлов и сплавов, особое место из которых занимает квазихимический вариант модели микронеоднородного строения расплавов, освещенный в работах [4-6].

Однако, гораздо меньше имеется работ по экспериментальному исследованию и расчетному определению вязкости высоколегированных сталей [2, 7-11].

Один из методов расчета вязкости многокомпонентных расплавов предложен в работе [10]. Расчетная формула этого метода имеет вид:

$$\ln \nu = \sum_{i=1}^n N_i \ln \nu_i - \frac{\Delta H_T}{3RT}, \quad (1)$$

где ν – кинематическая вязкость расплава стали, м²/с; N_i – мольная доля i -того компонента; ν_i – вязкость чистого i -того компонента, м²/с; ΔH_T – энтальпия образования раствора легирующих элементов в железе, Дж/моль.

Для регулярных растворов выражение имеет несколько другую форму:

$$\ln \nu = \sum_{i=1}^n N_i \ln \nu_i - \frac{1}{3} \sum_{i=1}^n N_i \ln \gamma_i, \quad (2)$$

где γ_i – коэффициент активности i -того компонента в стали.

Следует отметить, что этот метод не пригоден для расчета вязкости расплавов, содержащих такие тугоплавкие составляющие, как Mo, W, Cr, V и др., для которых неизвестны величины вязкости ν_i .

Другой метод расчета вязкости основан на модели жестких сфер. Согласно работе [2], где этот метод получил развитие, кинематическая вязкость определяется из уравнения:

$$\left(\frac{\partial \ln \nu}{\partial x_i} \right)_{T, x_i \rightarrow 0} = \left(\frac{1}{3\mu} + \frac{1,87}{1 - 1,87\mu} \right) \left(\mu_i^0 - \mu_1^0 - 0,524 \frac{\mu_1^0}{V_1^0} \Delta V_i^\infty \right) + \frac{1}{3V_1^0} (\bar{V}_i^\infty - V_1^0) - (M_i - M_1), \quad (3)$$

где x_i – мольная доля i -того компонента; μ – коэффициент упаковки жестких сфер; μ_i^0 и μ_1^0 – коэффициенты упаковки жестких сфер чистых i -того компонента и растворителя соответственно; ΔV_i^∞ и \bar{V}_i^∞ – соответственно избыточный парциальный объем и парциальный объем компонента i в бесконечно разбавленном растворе, м³/моль; V_1^0 – объем чистого растворителя, м³/моль; M_i и M_1 – молярная масса i -того компонента и растворителя соответственно; кг/моль.

¹ ПГТУ, д-р техн. наук, проф.

² ПГТУ, аспирант

Однако, сложность рассмотренного метода заключается в том, что для многих элементов (C, P, S, W, Mo, и др.) коэффициенты упаковки жестких сфер неизвестны (эти коэффициенты определяются по экспериментальным данным о структурных или физических свойствах расплавов).

Наиболее подходящим, на наш взгляд, метод оценки вязкости сложнелегированных сталей, предложен авторами работы [11]. Он основан на положениях осцилляторной теории жидкости. Расчетная формула по этому методу имеет вид:

$$\nu = \nu_0 \left(1 + \sum_{i=1}^{n-1} \xi_i N_i \right), \quad (4)$$

где ν и ν_0 – кинематическая вязкость расплава и чистого растворителя (железа) соответственно, $\text{м}^2/\text{с}$; ξ_i – коэффициент, характеризующий влияние i – го компонента на вязкость растворителя; N_i – мольная доля i – го компонента.

В работе [11] формула (4) была проверена путем сопоставления расчетных и опытных значений вязкости для 11 легированных сталей и 6 сплавов на основе никеля. Расхождения результатов расчетов с результатами экспериментов составили $\leq 30\%$.

Цель настоящей работы – усовершенствовать метод расчета вязкости расплавов высоколегированных сталей, основанный на осцилляторной теории жидкости, сравнить расчетные и экспериментальные значения вязкости и оценить полученные результаты.

В работе [11] значения коэффициентов ξ_i принимались постоянными, тогда как в действительности ξ_i есть функция от мольной доли i – го компонента. С целью учета зависимости $\xi_i = f(N_i)$ для бинарных расплавов уравнение (4) преобразовали к виду:

$$\xi_i = \frac{\nu - \nu_0}{\nu_0 N_i}. \quad (5)$$

На основании данных работ [3, 12-14] по вязкости бинарных расплавов представили зависимость $\xi_i = f(N_i)$ в квадратичной форме $\xi_i = a \cdot N_i^2 + b \cdot N_i + c$, где a , b и c постоянные для данного компонента коэффициенты. Полученные уравнения имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} \xi_C &= -1336,2N_C^2 + 82,354N_C + 1,246 & [\%C] &= 0,1 \dots 1,5; \\ \xi_{Mn} &= 3678,4N_{Mn}^2 - 163,08N_{Mn} - 0,7387 & [\%Mn] &= 0,5 \dots 3; \\ \xi_{Si} &= -1046,9N_{Si}^2 + 113,02N_{Si} - 5,0923 & [\%Si] &= 0,8 \dots 2,5; \\ \xi_{Cr} &= -5,7906N_{Cr}^2 - 0,2244N_{Cr} + 1,9906 & [\%Cr] &= 0,3 \dots 25; \\ \xi_{Ni} &= 74,209N_{Ni}^2 - 29,636N_{Ni} + 2,7353 & [\%Ni] &= 0,4 \dots 25; \\ \xi_V &= -242,35N_V^2 + 19,63N_V + 2,1014 & [\%V] &= 4 \dots 10; \\ \xi_{Mo} &= 1887N_{Mo}^2 + 131,57N_{Mo} + 0,7498 & [\%Mo] &= 0,5 \dots 5; \\ \xi_W &= -107,59N_W^2 - 22,492N_W + 3,9973 & [\%W] &= 0 \dots 18. \end{aligned} \quad (6)$$

Коэффициенты ξ_i для серы и фосфора принимали постоянными, ввиду малого содержания этих элементов в расплаве, и равными $\xi_S = 1,07$, $\xi_P = -0,94$ [11].

Кинематическую вязкость расплава чистого железа вычислили как отношение динамической вязкости железа к его плотности, которые заимствовали из работы [3]:

По формулам (4) – (6) были рассчитаны величины вязкости ряда легированных марок сталей, исследованных экспериментально в работе [9]. Сравнение полученных результатов приведено в таблице.

На рисунках 1-3 расчетные данные сопоставлены с экспериментальными данными работы [9], а на рисунке 4 – с экспериментальными данными, полученными нами в работе [7].

Таблица – Сравнительная оценка расчетных данных вязкости легированных сталей с экспериментальными значениями из работы [11]

Сталь	Температура, °C					Сталь	Температура, °C				
	1550	1600	1650	1700	1750		1550	1600	1650	1700	1750
X25C3H	$\frac{1,08}{1,04}$	$\frac{0,99}{0,98}$	$\frac{0,92}{0,93}$	$\frac{0,86}{0,88}$	$\frac{0,81}{0,84}$	X18H9	$\frac{0,91}{1,00}$	$\frac{0,89}{0,94}$	$\frac{0,87}{0,89}$	$\frac{0,86}{0,85}$	$\frac{0,84}{0,81}$
X9C2	$\frac{0,96}{0,89}$	$\frac{0,86}{0,84}$	$\frac{0,82}{0,79}$	$\frac{0,79}{0,75}$	$\frac{0,77}{0,72}$	2X18H9	$\frac{0,96}{1,00}$	$\frac{0,92}{0,96}$	$\frac{0,89}{0,91}$	$\frac{0,87}{0,86}$	$\frac{0,85}{0,82}$
2X13	$\frac{0,85}{0,93}$	$\frac{0,80}{0,88}$	$\frac{0,77}{0,83}$	$\frac{0,75}{0,79}$	$\frac{0,73}{0,75}$	X17H2	$\frac{0,99}{1,00}$	$\frac{0,95}{0,96}$	$\frac{0,91}{0,90}$	$\frac{0,88}{0,86}$	$\frac{0,86}{0,82}$
X6C	$\frac{0,80}{0,80}$	$\frac{0,77}{0,75}$	$\frac{0,74}{0,71}$	$\frac{0,72}{0,68}$	$\frac{0,71}{0,65}$	P18	-	$\frac{1,05}{0,95}$	$\frac{0,96}{0,90}$	$\frac{0,91}{0,86}$	$\frac{0,89}{0,82}$
50C2	$\frac{0,72}{0,75}$	$\frac{0,70}{0,71}$	$\frac{0,69}{0,67}$	$\frac{0,68}{0,64}$	$\frac{0,67}{0,61}$	P9	-	$\frac{0,95}{0,92}$	$\frac{0,92}{0,87}$	$\frac{0,89}{0,83}$	$\frac{0,87}{0,79}$
X18H25	$\frac{0,86}{0,93}$	$\frac{0,85}{0,87}$	$\frac{0,84}{0,83}$	$\frac{0,83}{0,78}$	$\frac{0,82}{0,75}$	X3B6	-	$\frac{0,91}{0,89}$	$\frac{0,88}{0,84}$	$\frac{0,87}{0,80}$	$\frac{0,86}{0,78}$
X18H12	$\frac{0,88}{0,97}$	$\frac{0,87}{0,91}$	$\frac{0,85}{0,87}$	$\frac{0,84}{0,82}$	$\frac{0,83}{0,78}$	7X3	-	$\frac{0,87}{0,84}$	$\frac{0,86}{0,80}$	$\frac{0,85}{0,76}$	$\frac{0,84}{0,72}$

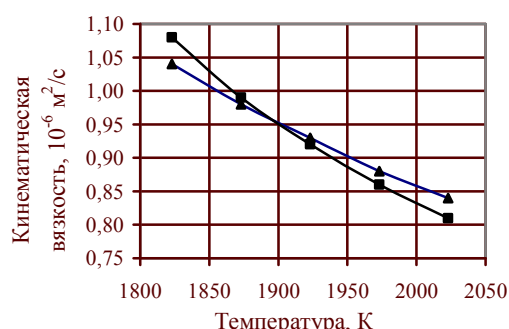


Рис.1 - Политермы вязкости расплава стали X25C3H:

▲ расчет
■ эксперимент

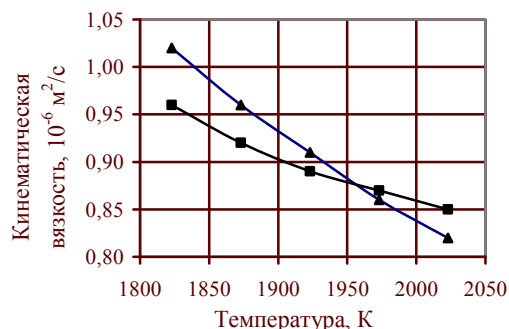


Рис.2 - Политермы вязкости расплава стали 2X18H9:

▲ расчет
■ эксперимент

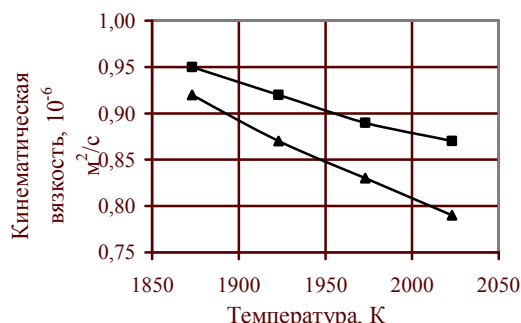


Рис.3 - Политермы вязкости расплава стали P9:

▲ расчет
■ эксперимент

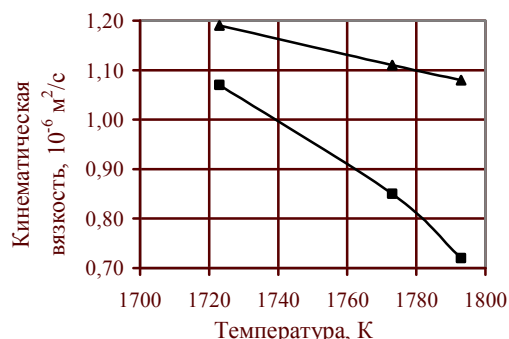


Рис.4 - Политермы вязкости расплава стали P0M2CФ10:

▲ расчет
■ эксперимент

Расхождения между экспериментальными и расчетными значениями вязкости для хромистых и хромоникелевых марок сталей составляет $\leq 10\%$, что в 3 раза меньше, чем в работе [11], в

которой не учитывалось зависимость коэффициентов ξ_i от мольной доли i – го компонента. Для инструментальных марок стали, исследованных в работе [9] ошибка расчета несколько больше и составляет $\leq 15\%$. Большее расхождение между расчетными и экспериментальными значениями вязкости наблюдается для инструментальных сталей, исследованных в работе [7]. Такие результаты можно объяснить повышенным содержанием углерода в этих сталях и соответственно большим числом карбидов и карбидоподобных кластеров в расплаве, присутствие которых не учитывается осцилляторной теорией.

Подобные исследования необходимо продолжить с целью разработки более совершенной методики расчета вязкости расплавов сложнолегированных сталей и для получения надежных экспериментальных данных о влиянии отдельных компонентов на вязкость сталей в области высоких температур.

Выводы

1. Предложена усовершенствованная методика расчета вязкости расплавов высоколегированных сталей, учитывающая влияние отдельных компонентов стали на ее вязкость в области высоких температур.
2. Расхождения расчетных и экспериментальных данных по вязкости жидких сталей составляет 10-15 %, что меньше, чем при расчете по известным ранее методам.
3. Для увеличения точности расчета вязкости жидких сталей необходимы более надежные исходные экспериментальные данные по влиянию содержания компонентов расплава на его вязкость в области высоких температур.

Перечень ссылок

1. *Ершов Г.С.* Структурообразование и формирование свойств сталей и сплавов/ *Г.С. Ершов, Л.А.Позняк.*- К.: Наукова думка, 1993.- 381 с.
2. *Островский О.И.* Свойства металлических расплавов/ *О.И. Островский, В.А. Григорян, А.Ф. Вишкарёв.*- М.: Металлургия, 1988.- 304 с.
3. *Арсентьев П.П.* Металлические расплавы и их свойства / *П.П. Арсентьев, Л.А. Коледов.*- М.: Металлургия, 1976.- 376 с.
4. Фундаментальные исследования физикохимии металлических расплавов. Памяти академика А.М. Самарина / Под ред. *Н.П. Лякишева.*- М.: ИКЦ "Академкнига", 2002.-469 с.
5. *Баум Б.А.* Металлические жидкости / *Б.А. Баум.*- М.: Наука, 1979.- 120 с.
6. Жидкая сталь / *Б.А. Баум, Г.А. Хасин, Г.В. Тягунов и др.*-М.: Металлургия, 1984.-208 с.
7. Экспериментальное исследование вязкости расплавов сложнолегированных инструментальных сталей / *С.Л. Макуров, Е.А. Казачков, М.В. Епишев, В.В. Мильчев* // Вісник Приазов. держ. техн. ун-ту: Зб. наук. пр. – Мариуполь, 2004. – Вип. 14. – С. 69-72.
8. Влияние температуры нагрева жидкой стали 10Х23Н18 на ее свойства и строение / *Б.А. Баум, Е.А. Клименков, Г.В. Тягунов* // Изв. АН СССР. Металлы.- 1985.- №3.- С.47-52.
9. *Ершов Г.С.* Влияние легирующих элементов на вязкость жидкого железа и сталей / *Г.С. Ершов, А.А. Касаткин* // Изв. вузов. Черная металлургия.- 1976.- №4.- С.141-146.
10. *Козлов Л.Я.* Прогнозирование вязкости многокомпонентных металлических расплавов / *Л.Я. Козлов, Л.М. Романов, Н.Н. Петров* // Изв. вузов. Черная металлургия.- 1983.- №3.- С.7-11.
11. Расчет вязкости многокомпонентных расплавов на основе железа и никеля / *Л.Я. Козлов, Л.М. Романов, А.П. Подъячев и др.* // Изв. вузов. Черная металлургия.- 1982.- №5.- С.1-4.
12. *Ершов Г.С.* Строение и свойства жидких и твердых металлов / *Г.С. Ершов, В.А. Черняков.*- М.: Металлургия, 1978.- 248 с.
13. *Цепелев В.С.* Вязкость сплавов железа с хромом / *В.С. Цепелев, Г.В. Тягунов, Б.А. Баум* // Изв. вузов. Черная металлургия.- 1983.- №4.- С.64-65.
14. Вязкость и плотность расплавов Fe-W-C и их изменение в процессе кристаллизации / *С.Ю. Денисов, О.И. Островский, Н.В. Гриценко и др.* // Изв. вузов. Черная металлургия.- 1986.- №5.- С.8-10.

Статья поступила 28.02.2005